Nupix-H2- 单片有源像素探测器电路设计

尹锐[1,2]，何芮[1,2]，黄菊[1,2]，袁红[1,2]，赵承心[1,2]

（1. 中国科学院近代物理研究所，兰州 730000；
2. 核科学与技术学院，中国科学院大学，北京 100000）[1]

摘要：在核物理和粒子物理实验中，顶点和径迹探测器主要用于获取对撞粒子的位置、能量、时间等信息。近年来，单片有源像素传感器(MAPS, Monolithic Active Pixel Sensor)在探测器领域引起了广泛关注。基于单片有源像素传感器技术，将设计一款名为 Nupix-H2 的芯片，该芯片采用国产 130 nm CMOS 工艺，像素阵列大小为 128 行×128 列，单个像素面积为 22 μm × 22 μm，采用 Rolling Shutter 的读出方式逐行扫描，按列依次输出每个像素单元的信息，扫描频率为 40 MHz。为了验证该芯片的可行性，本文设计了一个 1 行×16 列的测试阵列 Nupix-H2-，该像素阵列的能量信息通过电荷灵敏放大器读出，时间信息则通过计数器计量，系统可实现自动复位。仿真结果表明，该像素阵列的 ENC 小于 30 e-，能量分辨率约为 5%，时间分辨小于 25 ns。

关键词：像素探测器； CMOS 像素电路； MAPS； 粒子物理学。
中图分类号： TN710;TL56 **文献标志码：** A **doi：**

1 引言

作为中国重离子科学研究的领先平台，兰州重离子加速器（HIRFL, the Heavy Ion Research Facility in Lanzhou）和强流重离子加速器装置（HIAF, the High Intensity Heavy-ion Accelerator Facility）上的重离子物理和重离子应用推动了新型探测器技术的发展[1,2]，近年来，近代物理研究所在 HIAF 集群的基础上，开始建设以中国极化电子离子对撞机（EicC, the Electron-Ion Collider in China）为代表的新一代大物理实验装置[3]。随着这些科学装置的快速发展，在其上开展的物理实验对顶点探测器和径迹探测器的性能提出了更高的要求，而单片有源像素传感器（MAPS, Monolithic Active Pixel Sensor）是一种将传感器

收稿日期：2023 – XX – XX；修回日期：2023 – XX – XX
基金项目：国家自然科学基金（12222512，U2032209）
作者简介：尹锐(1996 –)，男，安徽合肥人，在读硕士研究生，从事模拟电路研究；E-mail：yinrui@impcas.ac.cn
通讯作者：赵承心，E-mail：chengxin.zhao@impcas.ac.cn

和前端电子读出系统集成在同一硅片上的探测器技术，具有高灵敏度、高空间分辨率、低噪声、低功耗等优势[4,5,6]，因此该技术目前已经被应用于多个高能物理粒子探测器中[7,8]。

但目前大多数 MAPS 只记录粒子击中的位置信息，为了满足物理学家对粒子性能研究的需求，需进一步提高探测器的时间和能量分辨，本设计基于国产 130 nm CMOS 工艺完成了 Nupix-H2 的验证芯片 Nupix-H2-的设计，能够同时对辐射粒子的位置、能量和时间信息进行高精度测量。

2 Nupix-H2- 结构与工作原理

Nupix-H2-的基本结构如图 1 所示，Nupix-H2-芯片共有 1 行×16 列，每个像素大小为 22 μm × 22 μm，每个像素均有能量和时间读出通路，可以对 0.1 - 10 ke^-量级的输入电荷进行测量，其中，能量路由电荷灵敏放大器、源跟随电路和模拟读出缓冲电路构成；时间路由电荷灵敏放大器、电压比较器、计数器（16 个像素共用一个计数器，计数器由每个像素中的 DFF 级联构成）、门控时钟电路、源跟随电路和数字读出缓冲电路构成。

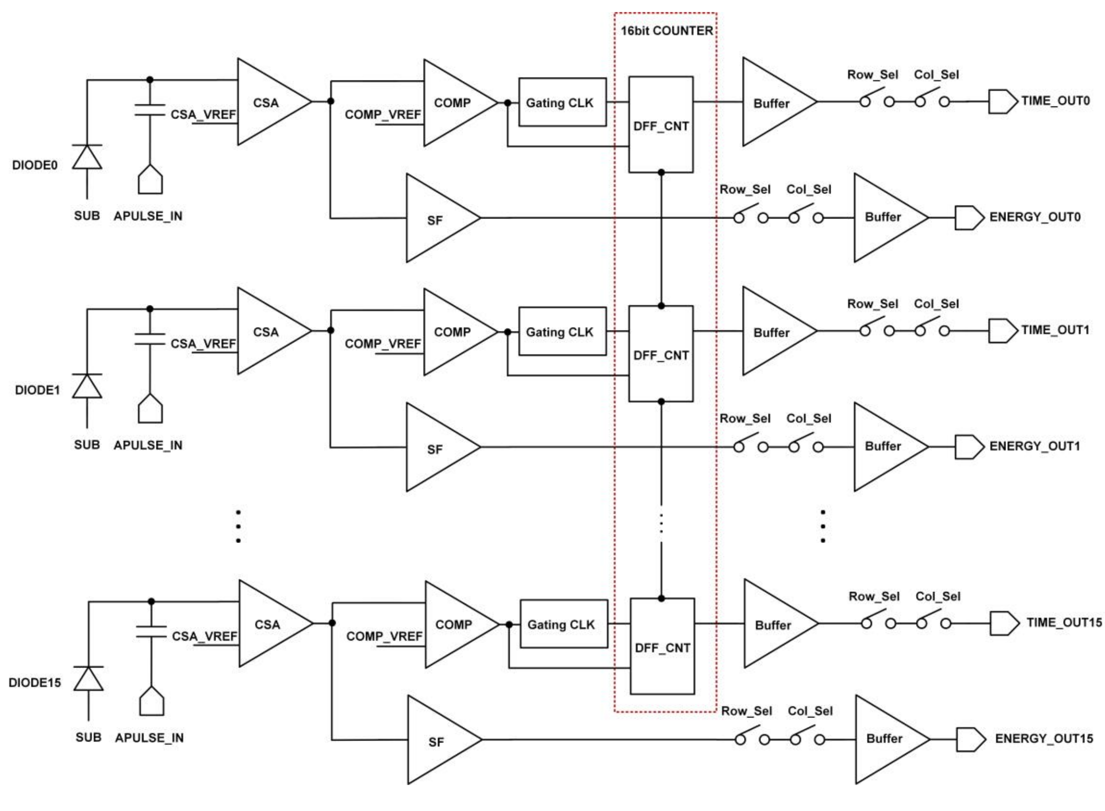


图 1 Nupix-H2- 芯片整体结构

图 2 所示为芯片的工作原理：

能量测量的方式为，重离子入射到像素单元后，沿入射径迹产生大量电子空穴对，这些电荷在电场的作用下被二极管收集[9,10]，经过电荷灵敏型的前置放大器（CSA, Charge

Sensitive preamplifier）接收放大并转化成电压信号，为了减少像素的面积，本设计通过增加 CSA 的 decay time 来替代峰值保持器。

时间的测量方式为，电荷被收集后，经过 CSA 转换为电压信号，再通过比较器甄别，得到跳变信号，该跳边沿将触发计数器进行计时，直到计时结束控制信号到来，从而得到粒子到达时间 ToA（Time of Arrival）。

正常工作状态下，在每个扫描周期开始时 STOP 为高电平，在每个扫描周期结束前 STOP 出现一个窄脉冲。当粒子入射时，能量路在 CSA 的长 decay time 的作用下，保持粒子入射产生的电压信号；同时计数器在比较器输出为高电平期间计时，当 STOP 为低电平时，门控时钟暂停计数器的时钟输入，计数器停止计时并保持时间信息，直到 CSA decay 结束，COMP_OUT 回到低电平，计数器自动复位。

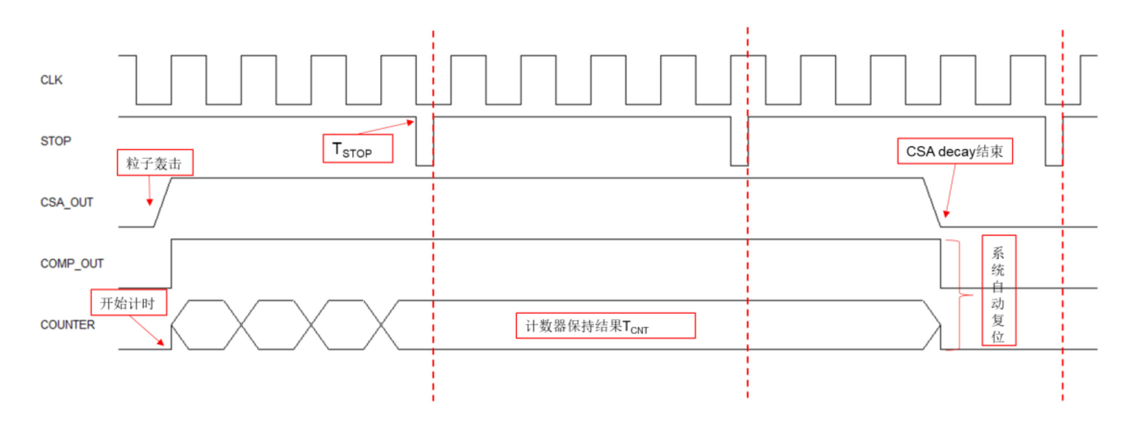


图 2 Nupix-H2- 各模块工作时序

粒子到达时间 ToA 的测量方式如图 2 所示，根据计数器输出的时间信息 T_{CNT}，可得：

$$ToA = T_{STOP} - T_{CNT} - T_{TimeWalk}$$

其中，ToA 为 STOP 信号下降沿的时间，T_{CNT} 为计数器输出的时间信息，$T_{TimeWalk}$ 为比较器的甄别时间误差。

3 关键电路设计与仿真

3.1 电荷灵敏放大器的设计

CSA 是高分辨能谱测量系统中常用的前置放大器，它具有增益稳定，噪声低等优点[11]。本文读出电路中前端放大器采用 CSA 的电路，其结构如图 3 所示，NMOS 管被用作反馈电阻，反馈电阻的大小可以通过调整该 NMOS 管的栅压来控制。本设计通过调节反馈电阻的尺寸和栅极电压增加 CSA 的 decay time 来保持电压信号，从而实现替代峰值保持器。

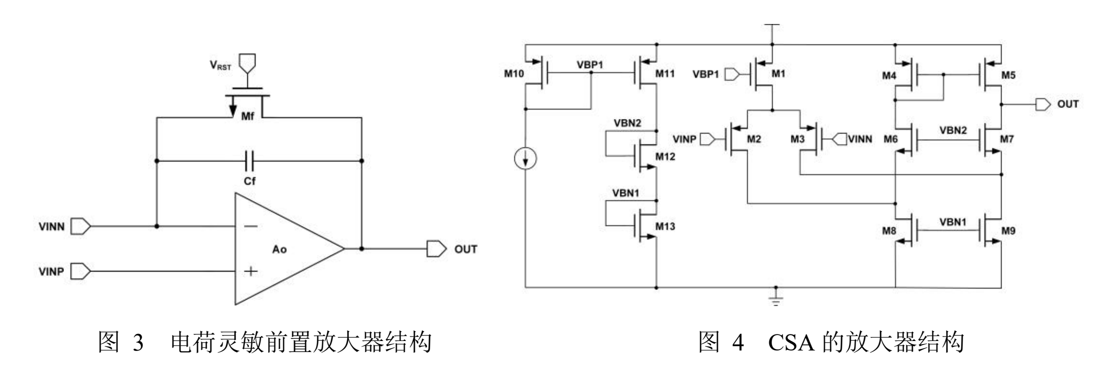


图 3　电荷灵敏前置放大器结构　　　　　　　　　图 4　CSA 的放大器结构

CSA 的放大器采用折叠共源共栅结构，如图 4 所示，该结构能够获得较大的输出动态范围。由于电荷敏感放大器采用负反馈形式，对电荷灵敏放大器进行零极点仿真，仿真结果如图 5 所示。可以看出电荷灵敏放大器的开环增益为 67 dB，相位裕度为 86°，稳定性良好。在输入 0.1 - 10 ke$^-$电荷下，输出幅值与输入电荷之间呈现明显的线性关系，如图 6 所示，其斜率显示 CSA 的转换增益为 99 μV/e$^-$以上。

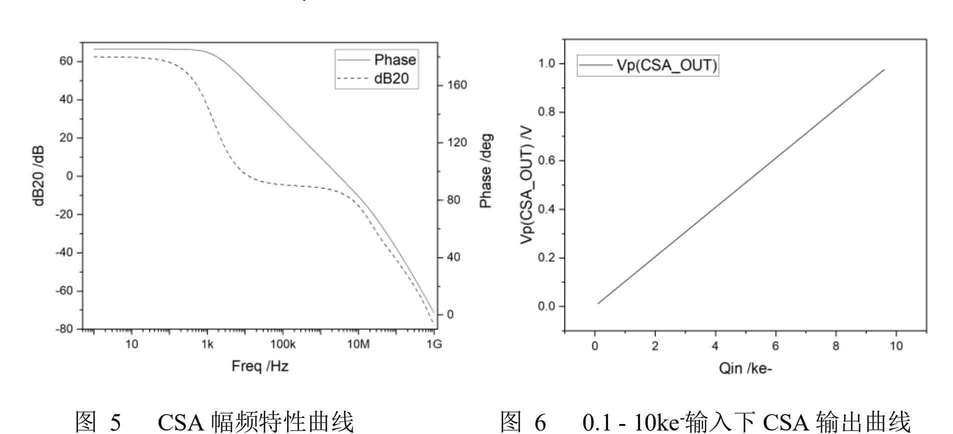


图 5　CSA 幅频特性曲线　　　　　　　图 6　0.1 - 10ke$^-$输入下 CSA 输出曲线

假设 CSA 输入端的总寄生电容为 Cd，根据图 3 所示的结构，此电荷灵敏放大器的等效输入电容为：

$$C_{ieq} = C_d + (1 + A_o) C_f$$

CSA 的输出电压V_o：

$$V_o = \frac{A_o Q}{C_d + (1 + A_o) C_f}$$

当放大器增益足够高时：

$$V_o \approx \frac{Q}{C_f}$$

因此，在 CSA 中，当放大器增益足够高时，其增益近似等于反馈电容的倒数，而不会受到电荷灵敏器件的寄生电容的影响，为了实现较大的电荷转换增益，且避免输出饱和，本

设计的 CSA 反馈电容设计为 1.3 fF，在版图中通过使用两层金属形成插指电容，并使用多层金属进行屏蔽以确保电容值的准确性，保证阵列中各个像素的一致性。

当衬底电压由于体效应而发生变化时，MOS 管的阈值电压会影响其等效电阻，而且 MOS 管的阈值电压随衬底偏压的变化不是线性的，因此要对不同衬底偏压下的 MOS 管阈值电压进行测试[12]。利用给外部信号调节反馈 NMOS 管的栅压，可以抵消阈值电压改变带来的阻值变化。在 1 ke^-输入下，为保证 CSA 在输出 100 μs 后仍能保持 70%左右的幅值，对不同衬底偏压下的 CSA 复位管栅极控制电压进行调整，结果如表 1 所示：

表 1 不同衬底偏压和栅极控制电压下 CSA decay 参数

衬底电压 SUB(V)	栅极控制电压(V)	100 μs 时输出压升（mV)	~decay time(μs)	100 μs 时能量保持比例
0	1.92	68.5	500	69.2%
	1.89	70.0	1000	70.7%
-1	2.06	68.7	500	69.4%
	2.04	69.8	1000	70.5%
-2	2.18	68.6	500	69.3%
	2.15	70.2	1000	70.9%
-3	2.29	68.1	500	68.8%
	2.26	70.0	1000	70.7%
-4	2.38	68.1	500	68.8%
	2.35	70.0	1000	70.7%
-5	2.46	68.2	500	68.9%
	2.43	70.0	1000	70.7%
-6	2.53	68.5	500	69.2%
	2.5	70.1	1000	70.8%

事实上，本设计的 CSA 可以根据实际需求，通过调节反馈管栅极电压，进行更大范围的 CSA decay time 的调整，以 SUB 为 0 V、1 ke-模拟输入的情况为例，CSA 的工作参数如表 2 所示。

表 2 CSA 工作参数

能量分辨率	ENC	电荷转换增益	Decay time 范围	幅值 Decay 至 70%最短/长时间
~2%	18 e^-	99 μV/e-	7 μs-5 ms	1.9 μs/ 670μs

3.2 电压比较器的设计

电压比较器通常用于比较两个电压信号的大小，当 CSA 的输出高于比较器的阈值时，比较器会翻转为高，而该翻转的上升沿包含粒子入射的时间信息。电压比较器的设计电路如图 7 所示，采用二级运放的结构。参考电压 COMP_VREF 由外部提供，可以通过其改变电压比较器的阈值。

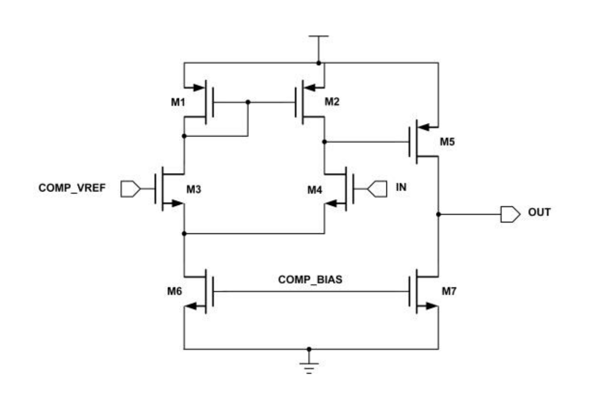


图 7　电压比较器结构图

本文中比较器的阈值是基于 CSA 的参考电压和最小输入电荷确定的，CSA 的参考电压为 1.6 V，电荷测量范围为 100 个 e⁻以上，因此 COMP_VREF 设定为 1.61 V，由此会产生一定的 TimeWalk[13]。对像素单元的 TimeWalk 进行后仿真，由于电荷收集二极管所收集到的电荷数大部分在 500 个 e⁻以上[14]，因此测试 0.5 - 10 ke⁻不同量级电荷输入间的 Time-Walk，测试结果如表 3 所示。

表 3　不同电荷输入间比较器的 TimeWalk 参数

Input e⁻	0.5 - 1 ke⁻	0.5 - 5 ke⁻	0.5 - 10 ke⁻
Time walk (ns)	51.6	91.3	95.8

考虑到本设计的电荷输入范围为 0.1 - 10 ke⁻，因此比较器参考电压的可调节范围为 1.61 - 2.6 V，提高比较器的阈值电压，再对比较器的 TimeWalk 进行测试，下表分别为最小输入电荷为 300 e⁻、500 e⁻、1 ke⁻下的测试结果。

表 4　不同参考电压下的 TimeWalk

COMP_VREF(V)	输入阈值电荷（e⁻）	0.5 - 1 ke- TW(ns)	0.5 - 5 ke- TW(ns)	1 - 10 ke- TW(ns)	5 - 10 ke- TW(ns)
1.63	300	133.1	190.3	62.2	5.1
1.65	500	-	-	90.7	5.9
1.7	1000	-	-	-	7.9

由表 4 可见，在不同参考电压下，比较器的 TimeWalk 不同，参考电压越高，即输入电荷阈值越高，TimeWalk 越大，将参考电压设置为 1.61V 可以使 TimeWalk 最小。

3.3 计数器的设计

计数器由多个 D 触发器级联组成，如图 8 所示，每个 D 触发器可以记录一个二进制位的状态，本设计 16 个像素共用一个 16 位 DFF 计数器，采用 40 MHz 的时钟，时间分辨率为 25 ns。

RST 信号控制计数器的计时起止，本设计将 COMP_OUT 接入计数器的 RST。当 COMP_OUT 输出为高电平时，计数器在时钟 CLK 上升沿开始计时，如果关停 CLK，则计数器计时保持；当 COMP_OUT 为低电平时，计时器置零。

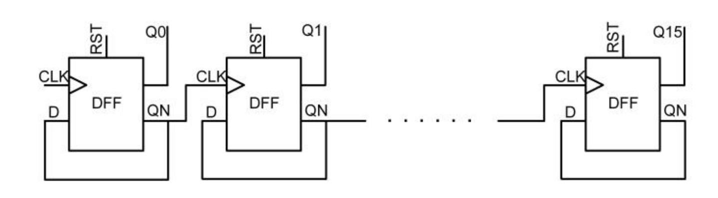


图 8　计数器结构图

3.4 门控时钟电路的设计

本设计需要保证时间信息在系统自动复位前保持住，可以通过将输入计数器的时钟暂停的方法来保持计数器信号。在 CMOS 电路中，门控时钟[15]是一个由控制信号启用或禁用的时钟信号，门控时钟能够减少电路的动态功耗并降低电磁干扰，特别是在低功耗设计中更为重要。在本设计中，门控时钟被用于暂停时钟信号以维持异步计数器的输出。

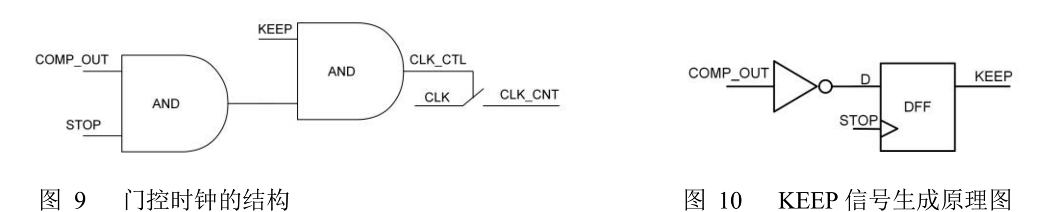


图 9　门控时钟的结构

图 10　KEEP 信号生成原理图

门控时钟电路结构图如图 9 所示，因为要实现在比较器输出 COMP_OUT 上升沿开始计时，在 STOP 的下降沿停止计时并保持信号，且为了保证每次粒子入射信息都能被读出，本设计中需要实现在比较器输出 COMP_OUT 电平未降下来之前，都要保持住计数器的信息。为了实现以上功能，使用两个与门与一个 DFF 共同控制计数器的时钟输入，除了 STOP 信号由外部控制，其他均由芯片内部产生。其中，KEEP 信号由 COMP_OUT 和 STOP 信号共同控制，结构如图 10 所示，比较器的输出经反相器接入 DFF，STOP 信号接入 DFF 的 CLK 端，因此当 STOP 上升为高电平时，输出的 KEEP 信号为比较器的反向信号，整个门控电路的工作时序如图 11 所示。

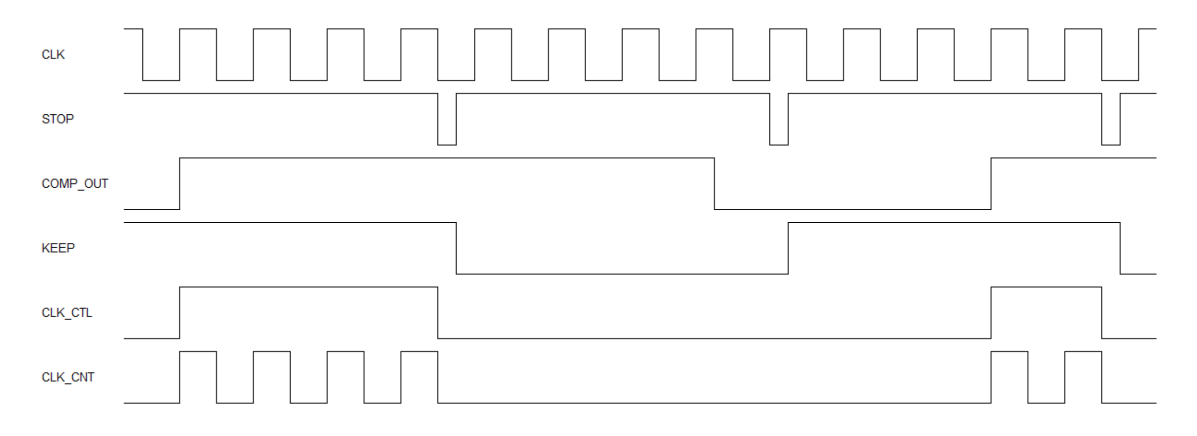


图 11　门控时钟电路的时序图

4　Nupix-H2-完整功能验证

为了减小数字信号和模拟信号之间的串扰，本设计将每个像素单元的模拟模块和数字模块分开布局，如图 12 所示，1 × 16 的测试像素阵列版图中，最左侧为门控时钟模块，依次往后为 0 - 15 号像素。每个像素单元左侧为模拟部分，右侧为数字部分，中间间隔 1.2 μm 左右。值得注意的是，由于本设计采用 16 个像素共用一个计数器，所以需要 16 位计数器中的 16 个 DFF 分散到 16 个像素里，再完成像素间的互联，最终实现计数器的功能，这种做法可以减小像素的面积和平均功耗。

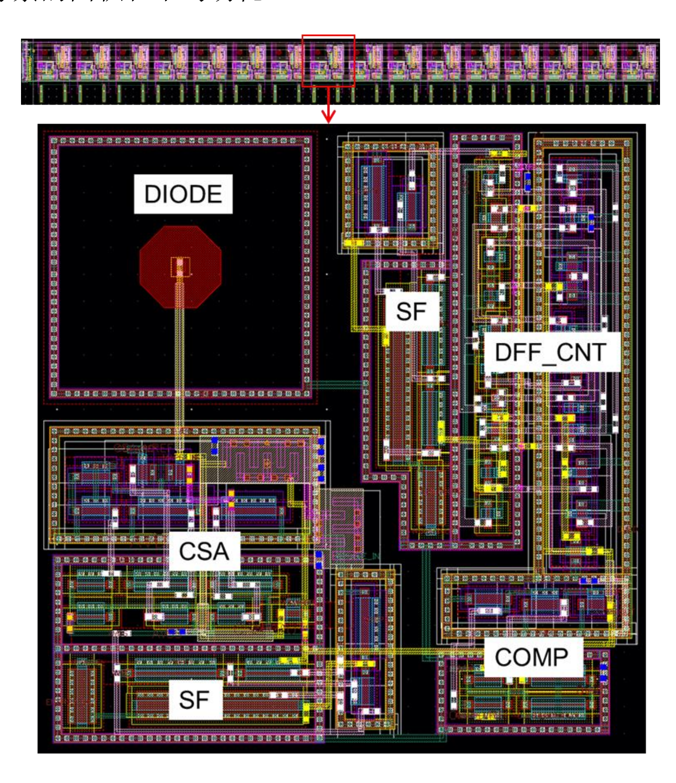


图 12　Nupix-H2- 阵列及单个像素 layout 图

本设计的测试阵列使用 Rolling Shutter[16]的方式进行测试，像素阵列中每个像素各有一个 ROW_SEL 和第一级源跟随，每列共用一个 COL_SEL 和源跟随。测试时，从第一行像素起，依次打开列选开关，按列逐个输出像素单元的信息。

假设阵列中第一行第一列像素单元被粒子击中， 3 个扫描周期内的此像素的时序图如图 13 所示：第一个扫描周期开始时无粒子入射，能量路 A_E_OUT[0]和时间路 A_T_OUT 无信号输出。粒子入射后，COMP_OUT 输出高电平，此周期结束前，控制 STOP 信号降为低电平，保留计数器时间信息。第二个扫描周期开始时，KEEP 信号使得时间信息继续保持，行列开关打开， A_E_OUT[0]和 A_T_OUT 分别输出粒子入射的能量和时间信息。第三个扫描周期开始时，能量路和时间路仍然可以输出上次粒子入射信息，直到输出电压低于翻转阈值，系统自动复位，等待下一次粒子入射。

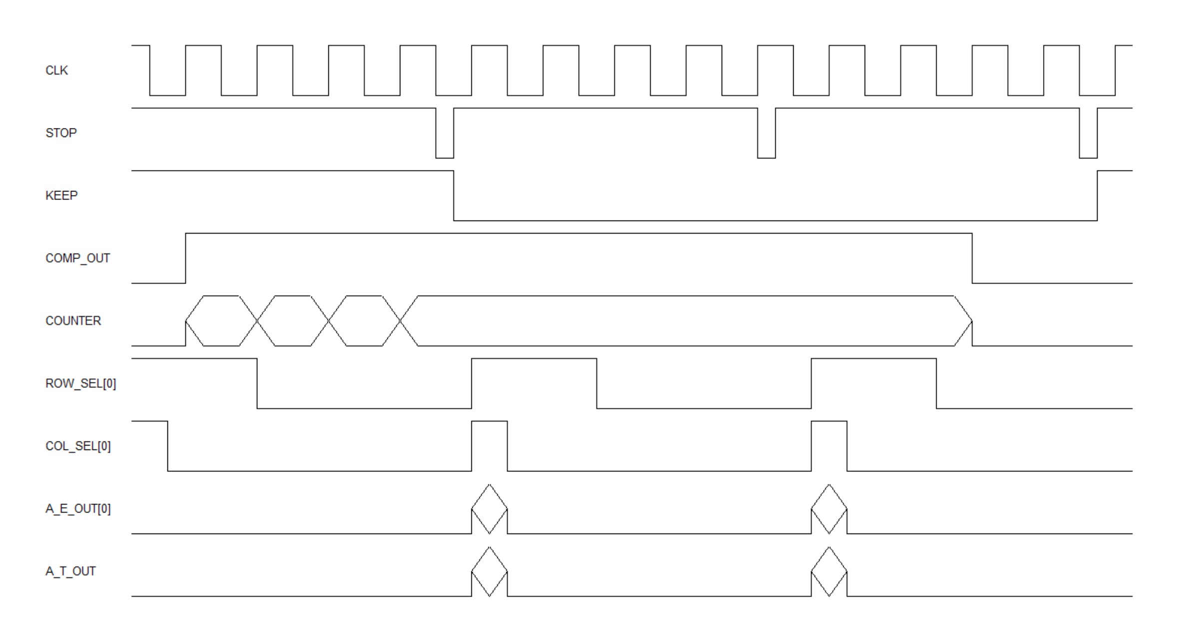


图 13 像素阵列读出时序图

值得注意的是，Rolling Shutter 的读出方式会带来一定的死时间[17]，如果粒子入射发生在行列扫描后，则会造成此次入射信息不会被输出，但本设计每次粒子入射的信息都会在本轮行列扫描结束时保存下来，并在下一轮行列扫描时被读出，有效避免了由 Rolling Shutter 结构带来的死时间。虽然本设计采用的 CSA 具有较长的 decay time，但是考虑到实际应用中粒子击中传感器的低事件率，因此 CSA 带来的死时间可以被忽略。

4.1 像素阵列能量路与时间路功能验证

设置 CSA 的参考电压为 1.6 V，比较器参考电压为 1.61 V，10 μs 时对 16 路能量路同时进行后仿真，其中，给 0 - 3 号像素以 1ke^{-}模拟电荷输入，4 - 7 号像素以 1.5 ke^{-}模拟电荷输入，8 - 11 号像素以 2 ke^{-}模拟电荷输入，12 - 15 号像素以 2.5 ke^{-}模拟电荷输入。能量路

仿真结果如表 5 所示，16 路同时模拟输入下，能量路工作正常，由于信号间存在一定的串扰，而且像素阵列的寄生电容较大，所以 CSA 的电荷转换增益有所下降，结果显示，1 ke$^-$输入下，CSA_OUT 的压升为~86 mV，即电荷转换增益为~86 μV/e$^-$，经过三级源跟随电路后的 A_E_OUT 的压升为~46 mV，因此能量路电荷转换增益~46 μV/e$^-$。1 ke$^-$输入下，CSA 完全 decay 结束约总共需要~500 μs。

表 5　能量路后仿真结果

输入电荷 / 输出压升	1 ke$^-$	1.5 ke$^-$	2 ke$^-$	2.5 ke$^-$
CSA_OUT (mV)	~86	~131	~179	~226
A_E_OUT (mV)	~46	~69	~96	~123

在输入 0.1 - 10 ke$^-$电荷下，对能量路输出进行扫描，其输出线性曲线如图 14 所示，可见测试阵列后仿 16 路能量路输出与输入电荷间满足线性关系，但是由于 16 个像素同时工作产生了串扰，能量分辨率为~5%。

对整体电路噪声进行 Transient Noise 仿真，全量程范围内电路的等效噪声电荷(ENC, Equivalent Noise Charge)结果如图 15 所示， 16 路能量路同时工作时，电路阵列的 ENC 小于 30 e$^-$，后仿的结果符合预期。

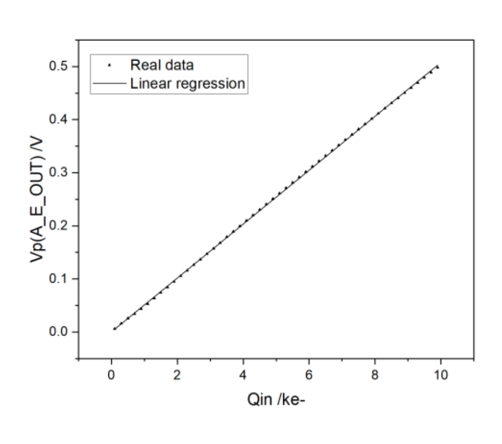


图 14　能量路输出与电荷输入线性关系

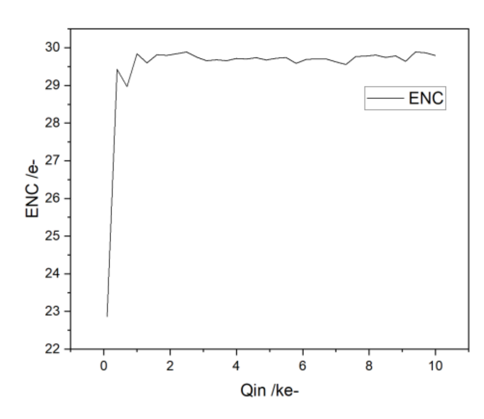


图 15　像素阵列 ENC 仿真结果

对测试阵列的功耗进行后仿测试，得到单个像素静态总电流为~1.34 μA，动态总电流为~3.88 μA。再以 1ke$^-$电荷模拟输入，分别在 10 μs 时击中第 0 号像素和在 550 μs 时击中 15 号像素；以 10 e$^-$在 1.1 ms 时击中第 7 号像素，仿真结果如图 16 所示。观察仿真结果，10 μs 和 550 μs 的两次电荷输入都使得计数器正常计时，而 1.1 ms 时的电荷输入由于没有到达测量阈值，因此此刻时间支路输出为 0。其中，在 10 μs 时，第一次电荷输入后 COMP_OUT 和 STOP 同时为高，时间路开始工作，计时的结果为模拟信号的电平输出，转换为数字信号即高电平为数字“1”，低电平为数字“0”，因此图中的时间信息为

0000111001011101b ；420 μs 左右，CSA 输出低于 COMP_OUT 翻转阈值，COMP_OUT 降为低电平，计数器信息清空，系统自动复位。

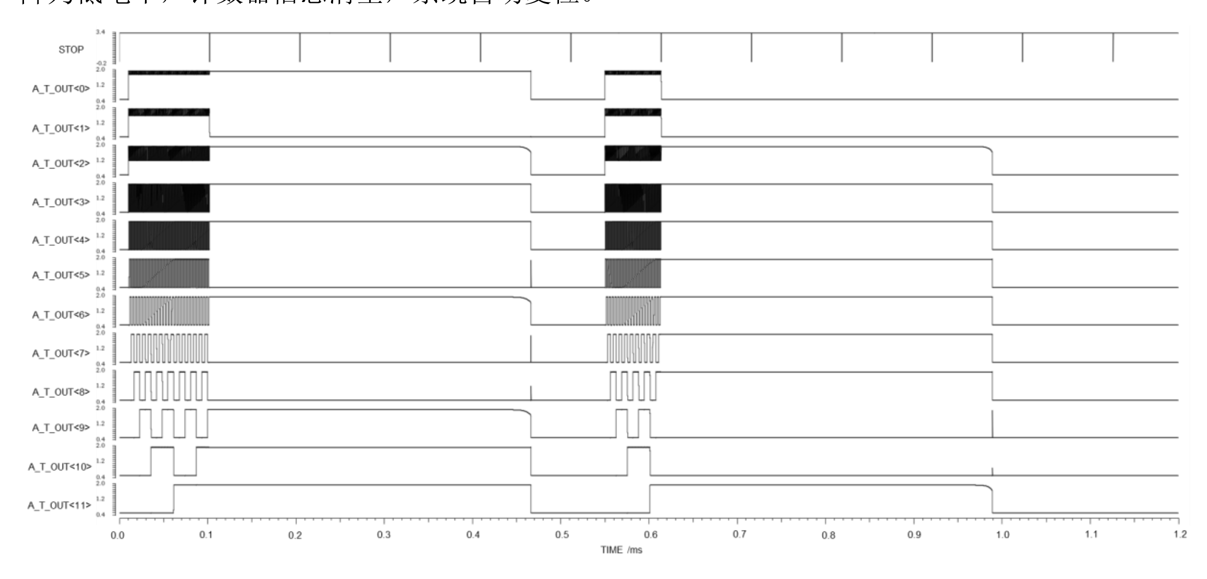


图 16　Nupix H2- 16 路时间路后仿结果

4.2 像素阵列数模混仿验证

因为测试阵列共 16 个像素，按 40 MHz 的时钟频率扫描，一个扫描周期设置为 400 ns，则行开关每次打开 25 ns × 16=400 ns，16 个列开关依次打开，每次打开 25 ns。STOP 信号在每个扫描周期开始时给高电平，记录粒子击中信息，结束前给低电平，保持粒子击中信息；START 信号给高电平时，若 SPEAK 信号同时为高电平，进入扫描读出状态，按 Rolling Shutter 模式开始读出，若 SPEAK 信号拉低，扫描则停止在当前状态。MARKER 为每次扫描读出周期开始的标志。

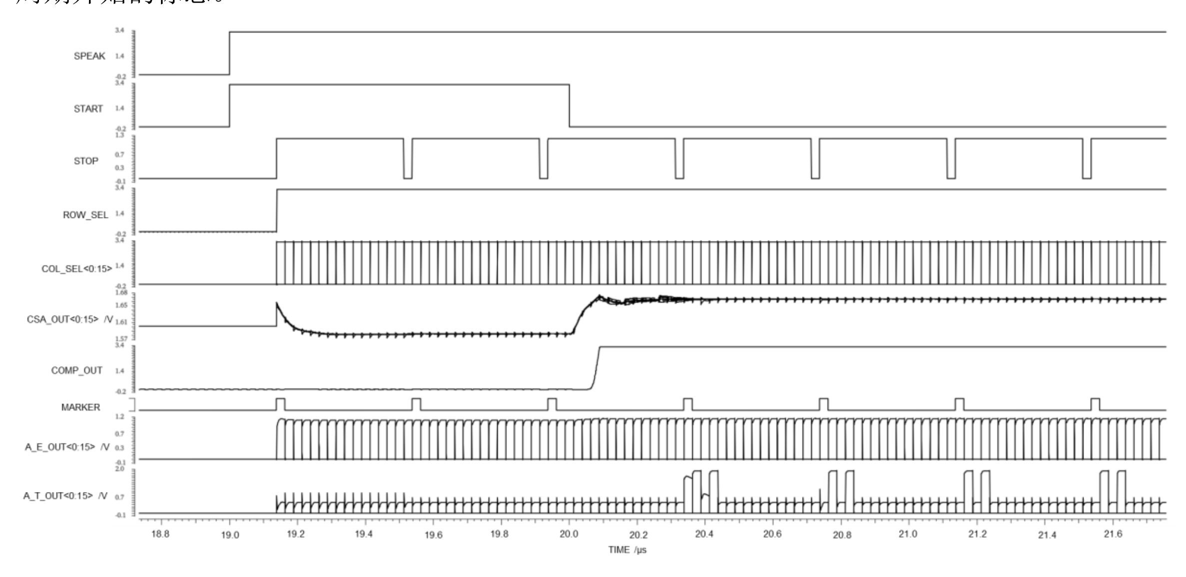


图 17　Nupix H2- 数模混仿结果

如图 17 所示为 6 个扫描周期的数模混仿结果，前两个扫描周期内没有电荷输入，第三个扫描周期内，给 16 个像素同时以 1 ke⁻的模拟输入，观察能量路输出电压信息，A_E_OUT<0 - 15>输出的能量幅值都为 1.153 V，而能量路无电荷输入时输出的基准电压为 1.11 V，因此能量路实际输出电压为 43 mV，电荷转换增益为 43 µV/e-。再观察时间路的信息，受到比较器信号翻转产生的电荷注入的影响，时间路的第一次输出信息不准确，为避免计时误差，需要观察电荷输入第二个扫描周期后的时间信息，真实时间信息为 000000001010b，即计时时间T_{CNT}为 250 ns，而 STOP 信号设置的时间为 20313 ns，再考虑 50 ns 左右的 Time Walk，则粒子到达时间$ToA = T_{STOP} - T_{CNT} - T_{TimeWalk}$=~20013 ns，实际粒子到达的时间为 20000 ns，误差为~13 ns，满足 25 ns 的时间分辨率。

5 结论

本文设计了一款可以用于探测粒子击中的时间信息、被击中像素的位置信息以及相对应的能量幅值的单片有源像素传感器芯片的测试阵列，该芯片像素测试阵列共 16 个像素单元，单个像素面积为 22 µm × 22 µm， ENC 小于 30e⁻，能量分辨率~5%，时间分辨在 25 ns 以内，经对芯片测试阵列进行仿真，芯片的各项功能和性能满足设计要求。下一步将完善 Nupix-H2 的 128 × 128 像素阵列设计，并提高电路的能量分辨率。

参考文献

[1] Yuan Y J , Gao D Q , Ma L Z , et al. Present status of HIRFL complex in Lanzhou[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1401(1):012003 (8pp). doi: 10.1088/1742-6596/1401/1/012003

[2] Yang J C , Xia J W , Xiao G Q , et al. High Intensity heavy ion Accelerator Facility (HIAF) in China[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B Beam Interactions with Materials and Atoms, 2013, 317:263-265. doi：10.1016/j.nimb.2013.08.046

[3] Anderle D P, Bertone V, Cao X, et al. Electron-ion collider in China[J]. Frontiers of Physics, 2021, 16: 1-78. doi: 10.1007/s11467-021-1062-0

[4] Turchetta R, Berst J D, Casadei B, et al. A monolithic active pixel sensor for charged particle tracking and imaging using standard VLSI CMOS technology[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2001, 458(3): 677-689. doi：10.1016/S0168-9002(00)00893-7

[5] Ratti L, Manghisoni M, Re V, et al. Non-standard approach to charge signal processing in CMOS MAPS for charged particle trackers[C]//IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record, 2005. IEEE, 2005, 2: 969-973.

[6] Ratti L. Continuous time-charge amplification and shaping in CMOS monolithic sensors for particle tracking[J]. IEEE transactions on nuclear science, 2006, 53(6): 3918-3928. doi：10.1109/TNS.2006.886048

[7] Senyukov S, Baudot J, Besson A, et al. Charged particle detection performances of CMOS pixel sensors produced in a 0.18 µm process with a high resistivity epitaxial layer[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated E

quipment, 2013, 730: 115-118.
[8] Rinella G A, ALICE collaboration. The ALPIDE pixel sensor chip for the upgrade of the ALICE Inner Tracking System[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2017, 845: 583-587.
[9] Musseau O. Charge collection and SEU mechanisms[J]. Radiation Physics and Chemistry, 1994, 43(1-2): 151-163. doi：10.1016/0969-806X(94)90208-9
[10] Ren W, Zhou W, You B, et al. Topmetal-M: A novel pixel sensor for compact tracking applications[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2020, 981: 164557. doi：10.1016/j.nima.2020.164557
[11] ZHOU C, YANG B, ZHAO X, et al. The application of Multisim software to the analyzing of the charge-sensitive preamplifier[J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2007 (3): 502-506. (in Chinese) doi：10.3969/j.issn.0258-0934.2007.03.020
(周超, 杨彬华, 赵修良, 等. Multisim 仿真软件在分析电荷灵敏前置放大器中的应用[J]. 核电子学与探测技术, 2007 (3): 502-506.)
[12] CHEN T. Design of pixel readout circuit in monolithic active pixel sensor[D]. Heilongjiang: Harbin Institute Of Technology, 2022:29-31. (in Chinese)
(陈童. 单片有源像素探测器像素读出电路设计[D]. 黑龙江:哈尔滨工业大学，2022:29-31.)
[13] YE C. Research and design of the data acquisition system for time-of-flight mass spectrometry. Hefei: University Of Science And Technology Of China, 2014:36-37. (in Chinese)
（叶春逢. 飞行时间质谱仪数据获取系统的研究与设计[D]. 合肥：中国科学技术大学，2014:36-37.）
[14] Yang H, Zhang H, Gao C, et al. Hi'Beam-S: A Monolithic Silicon Pixel Sensor-Based Prototype Particle Tracking System for HIAF[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2021, 68(12): 2794-2800. doi：10.1109/TNS.2021.3128542
[15] Panda P R, Silpa B V N, Shrivastava A, et al. Power-efficient system design[M]. Springer Science & Business Media, 2010:25-28.
[16] Turchetta R, Berst J D, Casadei B, et al. A monolithic active pixel sensor for charged particle tracking and imaging using standard VLSI CMOS technology[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2001, 458(3): 677-689. doi：10.1016/S0168-9002(00)00893-7
[17] Leo W R. Techniques for nuclear and particle physics experiments: a how-to approach[M]. Springer Science & Business Media, 2012:122-125.

Design of Nupix-H2- Monolithic Active Pixel Detector Circuit

YIN Rui[1,2], HE Rui[1,2], HUANG Ju[1,2], YUAN Hong[1,2], ZHAO Chengxin[1,2]

（1. Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences，Lanzhou 730000；

2. Institute of Nuclear Science and Technology, University of Chinese Academy of Sciences，Beijing 100000 ）

Abstract: In nuclear physics and particle physics experiments, vertex and track detectors are mainly used to obtain the position, energy and time information of colliding particles. In recent years, MAPS (Monolithic Active Pixel sensors) have attracted wide attention in the field of detectors. Based on MAPS, a chip named Nupix-H2 will be designed using the domestic 130 nm CMOS process. The pixel array is 128 rows × 128 columns, and the individual pixel area is 22 μm × 22 μm. The readout mode is in Rolling Shutter row-by-row scanning mode, and the information of the pixel unit is output by column, and the scanning frequency is 40 MHz. In order to verify the feasibility of this chip, a test array of 1 row × 16 columns named is Nupix-H2- designed, and the energy information of this pixel array is read through a charge-sensitive amplifier, and the time information is measured by a counter, the system can achieve automatic reset. Simulation results show that the chip test array has an ENC of 30 e^- or less, an energy resolution of ~5%, and a time resolution of 25 ns.

Key words: Pixel detector; CMOS Pixel Circuit; MAPS; Particle physics.